

Bioenergiakeskuksen julkaisusarja

(BDC-Publications)

Nro 17

# **HAKKEEN KUIVAUS BIOENERGIAKESKUKSEN MONIKÄYTTÖKUIVURISSA AURINGON ENERGIAA LISÄLÄMMÖNLÄHTENÄ HYÖDYNTÄEN**

Okko Rahikainen

2005





# **HAKKEEN KUIVAUS BIOENERGIAKESKUKSEN MONIKÄYTTÖKUIIVURISSA AURINGON ENERGIAA LISÄLÄMMÖNLÄHTEENÄ HYÖDYNTÄEN**

**Okko Rahikainen**

**Asiantuntijuushanke**

**Kesäkuu 2005**



**JYVÄSKYLÄN  
AMMATTIKORKEAKOULU**

# SISÄLTÖ

SISÄLTÖ .....	2
1 TYÖN TAUSTA .....	3
2 KOKEEN TAVOITTEET .....	4
3 TYÖN TOTEUTUS .....	4
3.1 Koejärjestelyt .....	4
4 TULOKSET .....	11
4.1 Hakkeen kuivuminen .....	11
4.1.1 Tuore hake .....	12
4.1.2 Ylivuotinen hake .....	14
4.2 Lämpötila ja auringon säteily .....	15
5 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	20
LÄHTEET .....	22

# 1 TYÖN TAUSTA

Polttopuun kuivaukseen liittyvät erilaiset ratkaisut ovat viime aikoina monipuolistuneet niin pienkiinteistöjen lämmittäjien kuin alalla suuremmassa mittakaavassa toimivien ammattilaisten keskuudessa. Erityisen ajankohtaiseksi asian on tehnyt kesän 2004 sääolot, jotka eivät olleet suosiolliset polttopuiden luonnonkuivauksen kannalta. Pilkkeiden keinokuivauksesta on olemassa varsin paljon tietoa ja tutkimustuloksia, sen sijaan hakkeen keinokuivaukseen ei ole paneuduttu tarmolla, vaikkakin maatilakokoluokassa hake lämmitysmuotona on hyvin suosittu valinta. Hakepuusavotoissa kesäaikaan kaadetut rangat on pääasiassa kuivattu ennen haketusta varastoimalla niitä tienvarsipinossa vähintään kesän, yleensä myös talven yli. Tokihan hakettakin on koneellisesti kuivattu mm. heinä- ja viljakuivureissa maataloilla, mutta hakkeen kuivauksesta on varsin vähän kirjallista tietoa saatavissa verrattuna pilkkeisiin. Hakkeen kuivauksen onnistumisesta annetut kommentit ovat monijakoisia. Hakkeen käytöstä ja haketekniikan kehitystarpeista maataloilla tehdyssä Työtehoseuran selvityksessä (Solmio & Valkonen 2002) hakekuivurin omistaneilla tiloilla suurimmaksi ongelmaksi koettiin hakkeen epätasainen kuivuminen. Muita ongelmia olivat hakkeen hidas kuivuminen ja kuivauspuhaltimen melu.

Kuivureissa puhallusilmalla haketta kuivattaessa ongelmaksi on muodostunut kuivumisen epätasaisuus. Kasaan, yleensä pintaan on päässyt muodostumaan märkäkerros kun kosteus on noussut ylös ja tiivistynyt. Bioenergiakeskuksessa kenttämestari Hannu Vilkkilän suunnittelemalla ja rakentamalla tutkimus- ja opetuskäytössä olevalla monikäyttökuivurilla on tehty pilkkeiden kuivauskokeita ja nyt tarjoutui mahdollisuus tarkastella hakkeen kuivausta. Kuivuri on rakennettu varasto- /merikonttiin, joka on vuorattu mustalla pellillä. Pellit toimivat samalla aurinkokeräimenä, kuivauksessa lämmennyt ilma puhalletaan seinämien ja välikaton kanavoinnin kautta sisälle konttiin. Puhaltimena kontissa on halkaisijaltaan 50 cm:n sähkömoottorilla (2,2 kW) toimiva potkuripuhallin. Kuivuriin liittyy myös monipuolista tekniikkaa mm. erilaisten ohjelmointimahdollisuuksien sekä kosteus- ja lämpötila-antureilta saatavan tiedon muodossa. Sääaseman weatherlink- ja kuivurin valvomo-ohjelmat tallentavat runsaasti dataa valvomossa olevan tietokoneen kovalevyille, josta kuivauksen edistymistä voidaan seurata.

## 2 KOKEEN TAVOITTEET

Kuivauskokeen tilaajana oli BTN-projekti. Työn tarkoituksena oli tutkia hakkeen kuivausta bioenergiakeskuksen konttikuivurissa auringon energiaa lisälämmönlähteenä hyödyntäen. Kuivurissa normaalisti puhallusilmalla tapahtuvan kuivatuksen sijaan ideana oli kuivattaa haketta alipaineella imemällä auringon lämmittämä ilma alakautta hakekasan läpi. Tarkoituksena oli näin ollen selvittää syntyykö märkäkerrosta johonkin kohtaan hakekasaa tällä kuivausmenetelmällä. Tavoitteena oli saada selville aurinkoenergian tehon vaikutusta kuivauksessa. Lisäksi oli mielenkiintoista saada käyttökokemuksia hakkeen kuivaamisesta bioenergiakeskuksen monikäyttökuivurissa. Kuivaus päätettiin toteuttaa kevään 2005 aikana (toukokuu), kuivausajanjakson kestoksi ajateltiin pieni säävaraus huomioiden yhtä viikkoa. Suunnitteluvaiheessa kontti päätettiin jakaa kahteen osaan, jossa toisella puolella kuivatettaisiin tuoretta ja toisella puolella ylivuotista haketta. Tämä järjestely sen takia, että tutkimukseen saataisiin verrokipari kahden erilaisen hake-erän välille.

Kuivuriin olennaisesti liittyvältä sääasemalta kertyvä tieto käsittää mm. lämpötilan, auringon säteilyn ja ilman suhteellinen kosteuden arvoja. Kuivurin eri antureilta saadaan esim. kontilta tietoja lämpötilojen kehittymisestä keräinten kautta kulkiessa sekä lukemia tulevan ja poistuvan ilman lämpötilasta ja vesimäärästä. Näitä tietoja hyväksikäyttäen oli tarkoitus todeta ja havainnoida kuivumisprosessia.

## 3 TYÖN TOTEUTUS

### 3.1 Koejärjestelyt

Ennen varsinaisen kuivauskokeen aloittamista muutama päivä kului tarvittavien valmistavien toimenpiteiden tekemiseen. Tämä käsitti lisäkeräimen (KUVIO 1) rakentamisen asfalttikentälle ja kuivurin muutostyöt sekä haketuksen. Lisäkeräimen ja kuivurin rakennustyöt tehtiin kenttämestari Hannu Vilkkilän johdolla. Aurinkokeräimen (n. 30 m<sup>2</sup>) rakennusmateriaalina käytettiin lankkuja, lautoja, rimoja ja muovivaletta, joten urakasta selviytyi varsin vähin tarvikkein ja investoinnein. Keräimen pohjalle asfaltin

pintaan levitettiin muovi maakosteuden katkaisemiseksi. Rakentaminen tehtiin samalla periaatteella kuin kattokin tehdään, lankuista tehtiin ruoteet, jotka yhdistettiin laudoilla ja sen päälle asetettiin kasvihuonemuovi keräinpinnaksi, lisäksi puutavara maalattiin vielä mustaksi.



KUVIO 1. Kuivuri ja aurinkokeräin.

Toinen vaihe käsitti kuivurin muutostyöt. Puhaltimen paikka ja pyörimissuunta muutettiin imumenetelmää varten. Puhallin siirrettiin ”vinttikerroksen” päätyseinältä sivuseinälle tehtyyn uuteen aukkoon (KUVIO 2). Ilma ohjautui keräinten kautta kontin yläosaan josta se kulki kahden välikattoon tehdyn reiän läpi kuivuriin ja imettiin hakekerroksen läpi. Kuivurin sisälle konttiin tehtiin väliseinä (KUVIO 3) vanerilevyistä hake-erien erottamiseksi toisistaan, väliseinän päälle kiinnitettiin lankusta tehty ”kävelysilta” näytteiden ottamista varten. Ovien puoleiseen pätyyn asetettiin lisäksi vanerilevy päätyseinäksi. Väliseinän paikoilleen asettamisessa ja jämäköittämisessä hyödynnettiin kulmarautoja sekä lankkuihin moottorisahalla tehtyä uraa, joihin levy kätevästi upposi.



KUVIO 2. Puhallin ja tuulimittari asennettuna uudelle paikalleen.



KUVIO 3. Kontti tyhjänä ennen kuivauksen aloittamista.

Molempia hakelaatuja oli kuivurissa omilla puolillaan n. 7 i-m<sup>3</sup>. Haketus tapahtui traktoriin kytketyllä Junkkari HJ 5M mallisella laikkahakkurilla (KUVIO 4). Sekä tuore että ylivuotinen raaka-aine haketettiin suoraan kuivurikonttiin omille puolilleen. Tuore hake koostui melko tasaisesti lepistä, koivuista ja männyistä, ylivuotinen hake-erä oli pääasiassa mäntyä. Haketuksessa konttiin haketettiin aina tarvittavaan kerrokseen (pohja, keski, pinta) vaadittava hakemäärä, jonka jälkeen se levitettiin tasaiseksi patjaksi ja asetettiin näytepussit paikoilleen. Hakenäytteet olivat kankaisissa verkkopusseissa (KUVIO 5) eri puolilla ja eri korkeudella hakekasoja. Molempiin hake-eriin asetettiin jokaiseen kolmeen kerrokseen kuhunkin 12 kpl näytepusseja, eli kaiken kaikkiaan näytepusseja oli hakkeen seassa kuivurissa yhteensä 72 kpl. Pussit suljettiin naruilla, jotka olivat puolestaan kiinni konttia ympäri kiertäneessä vahvemmassa narussa. Näytteiden asettelussa käytettiin hyväksi erivärisiä naruja ja teippiä, jotta tiedettiin näytteiden laitossa ja poisotossa missä syvyydessä kasaa mikin näyte sijaitsee, valkoiset narut olivat pohjakerroksen näytepusseissa, vihreät keskikerroksen ja punaiset pintakerroksen näytteissä.





KUVIO 4. Haketus käynnissä.



KUVIO 5. Näytteenotossa apuna käytettiin kankaisia verkkopusseja.

Kuivuriin hahmoteltiin molempiin hake-eriin kolme sektoria joissa näytteet sijaitsivat. Ensimmäinen sektori oli kuivurin keskiosassa puoliympyräkaaren sisällä, toinen sektori käsitti tästä ulomman ja pidemmän kaaren ja kolmas sektori muodostui toisen kaaren ulkopuolelle kontin molempiin päätyihin. Kullekin sektorille tuli 4 mahdollisuutta näytteenottoon (3 kuivauksen aikana, 1 lopetuksessa). Kultakin sektorilta otettiin kunakin näytteenottopäivänä samasta kohdasta eri korkeuksilta näytteet. Näytteiden ottopaikka eri sektoreilta määräytyi satunnaisesti jokaisella näytteenottokerralla. Hakekasojen paksuus oli n. 1,05–1,15 metriä.

### **Kuivurin asetukset**

Kuivauskoeajanjaksona oli viikko, kuivaus aloitettiin perjantaina 20.5.2005 puoliltapäivin ja lopetettiin seuraavan viikon perjantaina 27.5.2005 n. klo kolmen maissa iltpäivällä. Kuivurin käyntiajaksi ohjelmoitiin klo 8.00–22.00, eli puhallin olisi käynnissä tällä aikavälillä. Puhaltimen käyntinopeudeksi asetettiin 40 Hz, jolloin melu pysyi siedettävällä tasolla. Suunnitelmien mukaan puhallin olisi käynnissä 60 min ja samuksissa 10 min. Kuivaustehokkuudeksi määritettiin 1 g, eli kuivuri olisi käynnissä silloin kun vettä poistuisi vähintään gramma kilossa kuivaa ilmaa. Sääaseman ja kuivurin tietojen tallennus ohjelmoitiin tapahtumaan puolen tunnin välein valvomon (KUVIO 6) keskusyksikölle. Kuivauksen aikana tosin ilmeni syystä tai toisesta ohjelmointiasetuksista poikkeavia toimintoja, esim. puhallin oli välillä käynnissä silloinkin kun ei olisi pitänyt.



KUVIO 6. Kuva valvomosta, takaseinällä sääaseman näyttötaulu ja ruudulla kuivumisen prosessikaavio.

### Kosteuden määritykset

Hakkeiden kosteudet selvitettiin ISO 589 standardiin perustuen (Alakangas 2000, 26–27). Määrityksessä kaksi 30–100 g painoista näytettä punnitaan 0,01 g tarkkuudella. Punnittuja näytteitä kuivattiin Bioenergiakeskuksen lämpökaapissa (KUVIO 7) 16–18 h, jonka jälkeen ne punnittiin kuumina. Kosteus saatiin selville seuraavalla kaavalla:

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

$M_{ar}$  = märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)

$m_1$  = märän näytteen massa (g)

$m_2$  = kuivatun näytteen massa (g)



KUVIO 7. Kosteuden määrittämisessä käytetyt apuvälineet.

Kuivauksen aikana näytteitä otettiin kolme kertaa, lisäksi näytteitä otettiin kuivauksen aloituksen ja lopetuksen yhteydessä. Tuoreella hakkeella lähtökosteus oli 43,1 % ja ylivuotisella hakkeella 35,5 %. Hakelämmitys pienoppaan (2001) mukaan kaato-tuoreen rankahakkeen kosteus on yleisesti välillä 40–60 %, ylivuotisella tavaralla noin 35 %:n luokkaa. Tuoreen hakkeen melko alhaista kosteutta selittää se, että keväällä kaadettu puu on muihin vuodenaikoihin verrattuna kuivempaa.

## 4 TULOKSET

Kelit kuivausviikon aikana olivat varsin otolliset verrattuna aiempien viikkojen epävakaisiin sääolosuhteisiin. Heti kuivauksen aloituspäivästä lähtien oli putkeen aurinkoisia poutapäiviä, kuivauksen loppuvaiheessa sää alkoi taas muuttua epävakaisemmaksi.

### 4.1 Hakkeen kuivuminen

Ensimmäiset näyte-erät otettiin viikonlopun yli kuivatetusta hakkeesta ja sen jälkeen kahtena seuranneena päivänä sekä kuivauksen lopetuksen yhteydessä. Näytteenotossa ilmeni hankaluuksia alimmaisessa kerroksessa sijaitsevien hakepussien kohdalla. Alimmaisista näytteistä ei saatu esille ennakkokaavailujen mukaisesti ensimmäisillä näytteenottokerroilla. Pussit olivat pääsääntöisesti niin tiukassa pohjakerroksessa, että

väkinä vetämällä naru lopulta katkesi ja pussi jäi pohjalle, pussit ja solmut pussin suissa kestivät kylläkin hyvin repimistä. Tämän ongelman johdosta alimmaisista näytteistä otettiin enemmälti ylös vasta kun keski- ja pintakerroksesta oli otettu muutamia näytteitä tieltä pois ja näin päästiin kaivamaan alimmaisista näytepusseja ylös sotkematta pahemmin koejärjestelyä. Pinta- ja keskikerroksen näytepusseiden ylössaannin kohdalla ei ilmennyt mitään ongelmia. Hankaluudet alimmaisten näytepusseiden kohdalla saattoivat osin johtua siitä, että haketus tapahtui suoraan kuivuriin ja tämä on osaltaan edesauttanut hakkeen tiivistymistä. Näytteenotosta mainittakoon sen verran, että näytepusseiden suurehkon määrän ja alkuhankaluuksien johdosta näytepusseiden kanssa näprääminen on suhteellisen työlästä mutta menettelee vielä näillä hakekerroksen paksumuksilla. Jos ajatellaan vastaavanlaista koetta parin metrin paksuisessa hakekerroksessa, niin näytepusseiden ylössaanti on hankalaa ilman kaivauksia. Toimivien ratkaisujen hakenäytteiden ottoon olisikin eräänlainen kairatyypinen putkilosysteemi, jolla näytteitä saisi otettua eri korkeuksilta, tosin tällaisen kunnollisesti toimivan apuvälineen kehittäminen hakkeelle saattaisi osoittautua varsin kimmuranttiseksi.

#### 4.1.1 Tuore hake

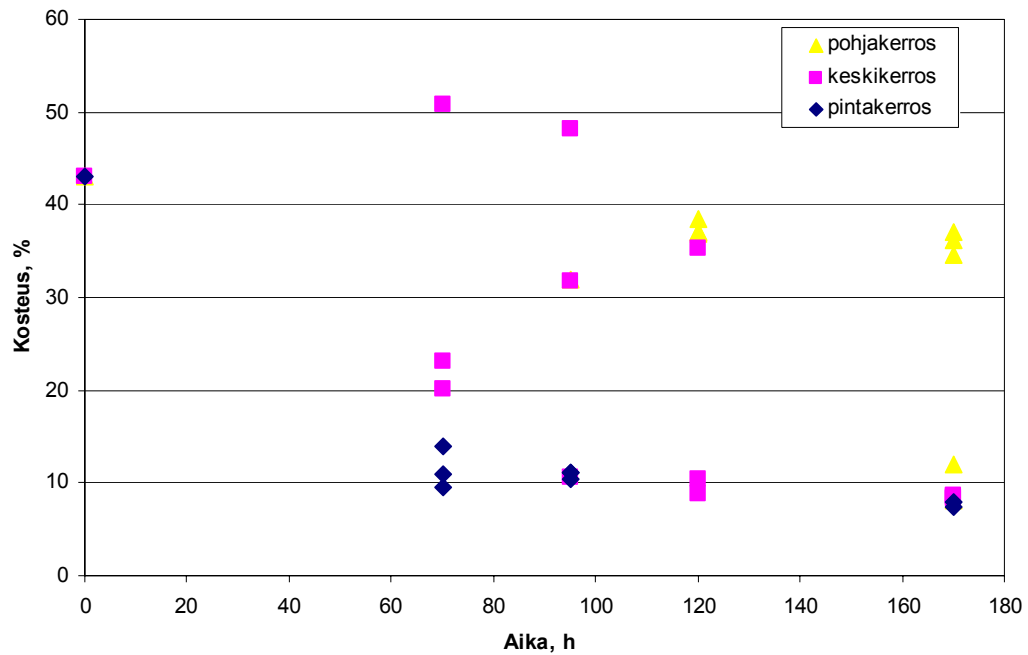
Pintakerros oli kuivunut jo parissa päivässä noin 10–14 % kosteuteen, vastaavasti keskikerroksen ensimmäisissä näytteissä kuivauksen aloituksesta kosteus vaihteli kuivurin eri osissa 20–51 % välillä, joten keskelle oli muodostunut märkäkerrosta ja kosteus hakkeessa paikoin jopa lisääntynyt. Seuraavana päivänä pintakerroksen kosteus oli näytteiden perusteella 10 ja 11 prosentin välillä. Keskikerroksessa näytti olevan edelleen märkäkerrosta (KUVIO 8.), eri puolilta otettujen näytteiden kosteus vaihteli n. 32–48 % välillä, poikkeuksena näyte kontin takapäässä, jonka kosteus oli vain n. 11 %. Keskikerroksen kosteimpien näytteiden kohdalla toisella sektorilla satunnaisgeneraattorin arpa osui näytteisiin, jotka olivat lähempänä oviaukon puoleista välikatton ilmanohjausaukkoa, jossa ilmavirtaus tuntui selvästi pienempänä kuin takaseinän puoleisessa aukossa. Märkäkerroksen syntymistä kyseiseen kohtaan kuivuria edisti todennäköisesti sekin, että hakkurin torven suuntaus haketuksessa oli valtaosan ajasta tähän kohtaan (=keskelle) konttia ja hake oli päässyt tiivistymään. Pohjakerroksesta ylös saadun näytteen kosteus oli 32 %. Seuraavana päivänä kolmansissa näyte-erissä keskityttiin keski- ja erityisesti pohjakerroksen näytteisiin, koska oli selvää, että pin-



nassa hake on kuivaa. Märkäkerros oli nyt viidentenä kuivauspäivänä pääosin siirtynyt kasan keskeltä pohjalle. Keskikerroksen näytteiden kosteus oli kuivurin takaseinän puoleisessa päässä n. 9-11 %, ovien puoleisessa päässä, jossa virtaus oli vähäisempi, kosteus oli kuitenkin vielä n. 35 %. Pohjakerroksen näytteiden kosteus oli eri puolilta kuivuria otetuissa näytteissä varsin tasaisesti 37–38,5 % välillä. Tutkimuksen lopetuspäivänä otetuissa näytteissä kosteus oli pinnasta 7–8 % luokkaa, joten pinta oli vielä hivenen kuivanut lisää. Keskikerros oli näytteiden perusteella kuivanut täydellisesti koko kuivurin alueelta, kosteuden ollessa nyt 8,3–8,6 % välillä. Pohjakerros ei ollut vielä kauttaaltaan kokonaan kuivanut ja kosteus olikin 34,5–36 % välillä, poikkeuksena takaosan ilma-aukon ja kovemman virtauksen lähistöllä olleet näytteet, joiden kosteus oli kahdeksan ja kahdentoista prosentin luokassa. Tuore hake oli näin ollen kuivunut viikossa pohjakerrosta lukuun ottamatta yli 43 % kosteudesta alle 10 % kosteuteen. Pohjakerroksen parempi kuivuminen ja märkäkerroksen poistuminen olisi ilmeisesti vaatinut vielä pari päivää kuivausta samoissa kuivausolosuhteissa. Kuviossa 9. on nähtävissä tuoreen hakkeen kuivuminen aikajanalla ja muutamien samanaikaisten, eri kohdista kuivuria otettujen näytteiden suurehko kosteudenvaihteluvälit. Märemmät näytteet olivat kontin etuosasta ja kuivemmat takaosasta, kuten tekstissä on aikaisemmin selostettu.



KUVIO 8. Kuivauksen aikana keskikerrokseen muodostunutta märkäkerrosta.



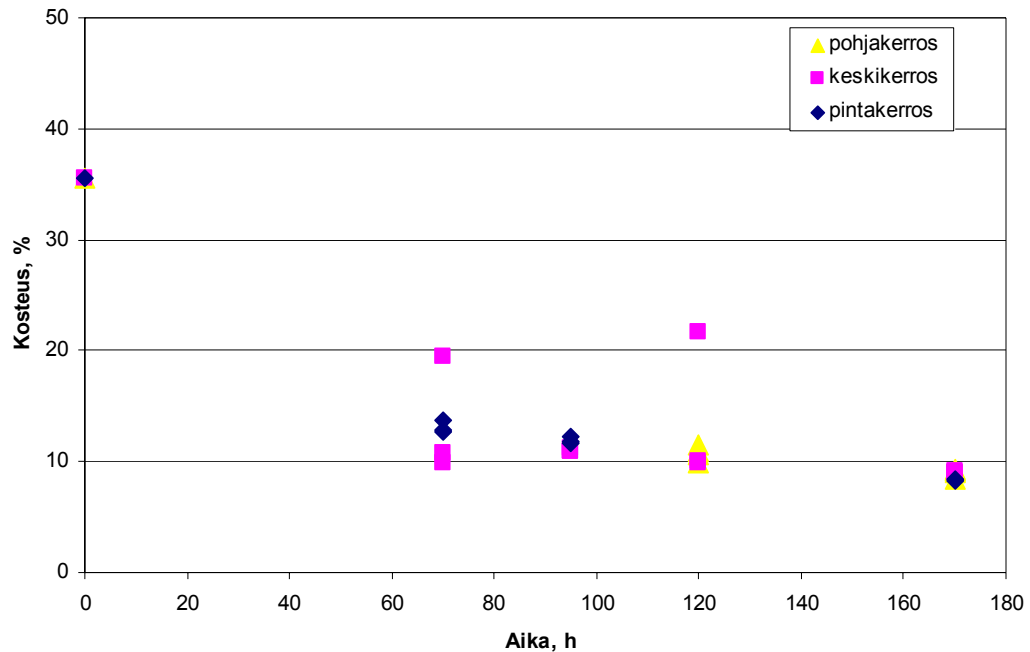
KUVIO 9. Tuoreen hakkeen kuivuminen tutkimuksen aikana.

#### 4.1.2 Ylivuotinen hake

Ylivuotinen hake kuivui nopeammin ja tasaisemmin kuin tuore hake-erä, koska lähtötilanteessa kosteus oli jo alhaisempi ja ilma todennäköisesti hakeutui enemmän kevyemmälle puolelle. Ensimmäisessä näyte-erässä kuivauksen aloituksesta kosteus oli pudonnut pintakerroksessa kuivurin eri osissa 12,7–13,7 % tasolle. Keskikerroksessa kuivurin taka- ja keskiosassa sijainneitten näytteiden kosteus oli noin 9 % ja 11 % tasolla, etuosasta otetun näytteen kosteus oli 19,4 %. Seuraavana päivänä pintanäytteitten kosteus oli hiukan 12 % molemmiin puolin, keskikerroksessa puolestaan 11 % luokkaa. Kolmannessa näyte-erässä kosteus oli keskikerroksen näytteissä kymmenessä prosentissa, poikkeuksena lähellä kontin nurkkaa ollut näytepusi, jossa kosteus oli 21,6 %. Pohjakerroksessa näytteiden kosteusarvot olivat n. 10–11,5 % tuntumassa. Kuivauksen lopetuspäivänä otettujen näytteiden kosteuspitoisuudet olivatkin sitten eri kerroksista ja eri kohdista kuivuria riippumatta tasaisesti 8,3–9,3 % välillä. Näin ollen voidaan todeta, että ylivuotinen hake oli kuivanut viikossa reilusta 35 % kosteudesta noin 9 % kosteuteen.

Kuviossa 10. on esitetty ylivuotisen hakkeen kuivuminen aikajanalla. Tulosten perusteella ylivuotisen hakkeen kuivattamiseen 20 % tasolle kuluu aikaa n. kaksi päivää.

Kosteudenvaihteluvälit jäivät eri kohdissa kuivuria vähäisiksi verrattuna tuoreen hakkeen tilanteeseen.



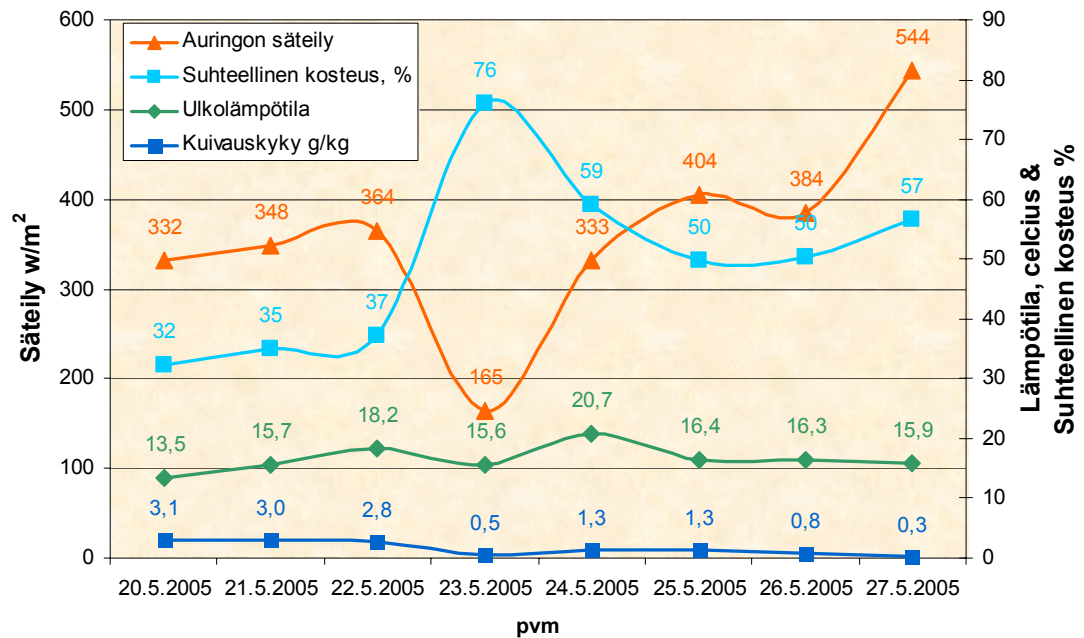
KUVIO 10. Ylivuotisen hakkeen kuivumisen eteneminen tutkimuksen aikana.

## 4.2 Lämpötila ja auringon säteily

Kuivausviikon aikana sääolosuhteet olivat varsin suosiolliset. Keskimääräinen ulkoilman lämpötila kuivauskoeajanjaksolla oli 16,7 °C, ilman suhteellinen kosteus oli n. 49,9 % ja auringon säteily n. 349 w/m<sup>2</sup>. Yksittäisien kokonaisien (klo 8.00–22.00) kuivauspäivien keskiarvoja tarkasteltaessa vastaavat alimmat päivälukemat olivat 15,6 °C, 35 % ja 165 w/m<sup>2</sup> sekä korkeimmat keskimääräiset päivälukemat 20,7 °C, 76 % ja 404 w/m<sup>2</sup>. Poimittaessa sääasemalta yksittäisiä tallentuneita tietoja kuivausajanjaksolta saadaan selville, että hetkellisesti ulkolämpötila on tutkimuksen aikana ollut korkeimmillaan 25,6 °C ja auringon säteily parhaissa olosuhteissa 994 w/m<sup>2</sup>, ilman suhteellinen kosteus on ollut alimmillaan 25 %. Aurinkosäteily on Keski-Suomessa vuosi- ja vaakatasolla n. 900 kWh/m<sup>2</sup>, vuorokaudessa säteily on Etelä-Suomessa touku- kuussa n. 5,13 kWh/m<sup>2</sup> (Säteily Suomessa 2003). Vettä kuivausajanjakson aikana poistui keskimäärin 1,65 g/kg ilmaa. Parhaimman kuivauspäivän aikana vettä poistui ilmakiloa kohti keskimäärin noin 3 g. Kuviossa 11. on esitetty päiväkohtaisia keskiarvoja näistä määreistä kuivausajalta. Ensimmäisen viiden kuivausvuorokauden ajalle



osui vain yksi heikompi kuivauspäivä, jolloin säteily oli alhaista ja ilman suhteellinen kosteus korkealla.



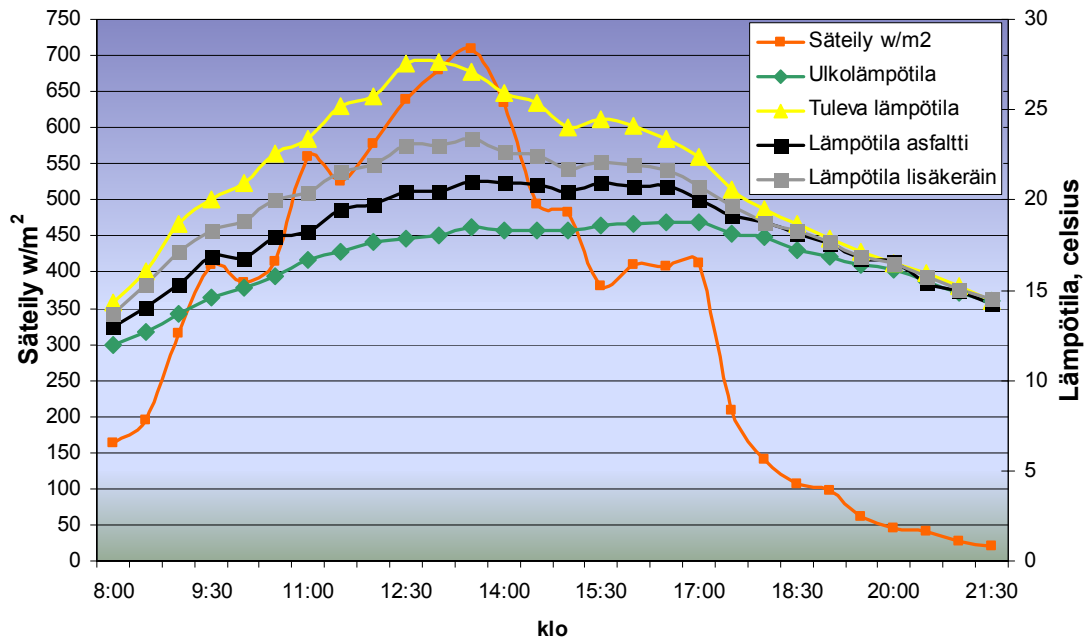
KUVIO 11. Päiväkohtaiset keskiarvolukemat kuivauksen ajalta.

Kuivuriin tulevan ilman lämpötila oli parhaimmillaan 13,7 astetta korkeampi kuin ulkolämpötila, joten keräinpinnat nostivat lämpötilaa merkittävästi. Korkeimmillaan kuivuriin tulleen ilman lämpötila oli lähes 35 °C. Kuivurista pois tuleva ilma oli pääsääntöisesti jäähtynyt muutamia asteita, enimmillään lämpötila oli laskenut 10 astetta. Osa lämpöenergiasta sitoutuu kontin rakenteisiin ja kuivauksen aikana ilmaan sitoutuu vesihöyryä, mikä laskee ilman lämpötilaa ja nostaa suhteellista kosteuspitoisuutta. Ilman lämpötiloja mitattiin kaikkiaan neljällä eri anturilla (KUVIO 12).



KUVIO 12. Lämpötilan asfaltin pinnasta mittaava anturi.

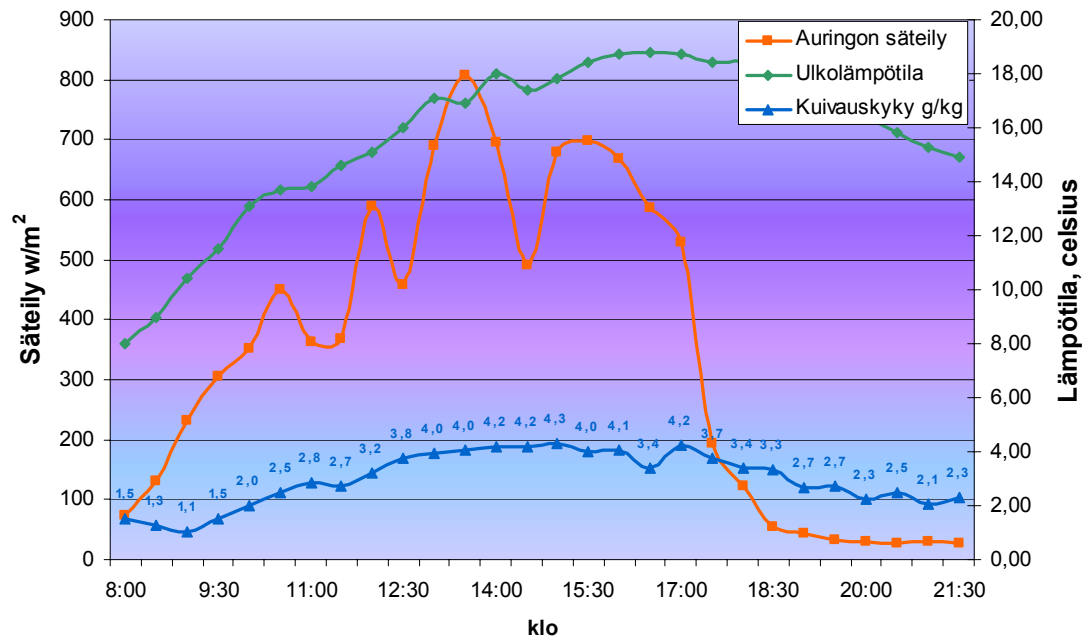
Kuviosta 13. näkyy miten ilma tullessaan konttiin sisälle lämpeni merkittävästi eri kellonaikoina keräinpintoja kohdatessaan.



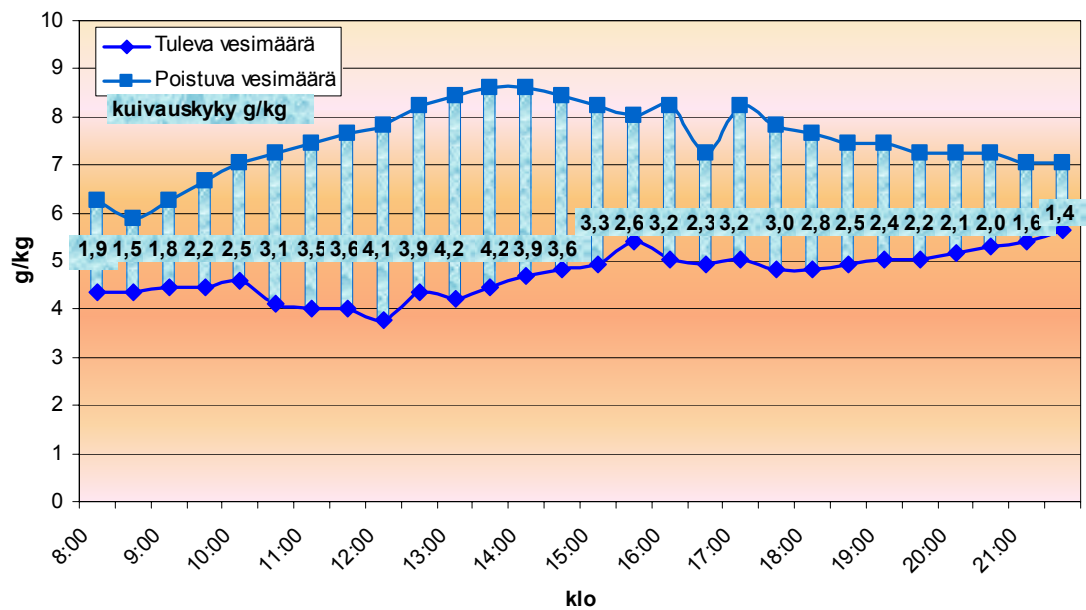
KUVIO 13. Keskimääräisen kuivauspäivän auringon säteilyn ja eri pintojen lämpötilojen kehitys kokeen aikana vallinneissa olosuhteissa.

Kuivuminen on tehokasta kun auringon säteilyarvot ovat korkeita ja ilman suhteellinen kosteus alhainen. Kuivauksessa vettä poistui eniten aikavälillä 10.00–17.00 kun olosuhteet olivat suosiolliset, tarkemmin määriteltynä kuivaus oli tehokkaimmillaan iltapäivällä kello yhdestä kello kolmeen.

Kuivauskapasiteetti oli veden poiston suhteen voimakkaimmillaan kuivauksen alkuvaiheessa. Kuviossa 14. on ensimmäisen kokonaisen kuivauspäivän tilanne nähtävissä veden poistumisen kannalta, kuivausilma on koko päivän ajan sitonut melkoisesti vettä, joten ei ole ihme että pintakerros kuivui niin nopeasti. Kuviossa 15 on esitetty seuraavan päivän kuivauksen etenemismahdollisuutta ja samanlainen meno on jatkunut myös toisena kokonaisena kuivauskäyntipäivänä.



KUVIO 14. Veden sitominen ilmaan ensimmäisen täyden kuivauspäivän aikana.



KUVIO 15. Kuivurikonttiin tulevan ja poistuvan ilman vesipitoisuus toisen täyden kuivauspäivän aikana.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hakkeen kuivaus auringon energiaa lisälämmönlähteenä hyödyntämällä osoittautui tehdyn kokeen valossa toimivaksi ratkaisuksi. Kuivaus tehostuu merkittävästi lämmitämällä kuivausilmaa, jo yhden asteen lämpötilan nousu pudottaa ilman suhteellista kosteutta 5 prosenttiyksikköä ja ilman kuivauskyky kasvaa (Järvenpää & Kivinen 1993, 13). Kuivaus on järkevintä tehdä alipaineella, imemällä ilma alakautta kasan läpi puhalluksen sijasta, mikäli haluaa tasaisesti kuivanutta haketta. Hake itse asiassa kuivui tutkimuksen aikana liikaakin, riittävä, suositeltava kuivatus on saada hake 20 % tasolle (Airaksinen, Alakangas, Alanen, Kainulainen, Puhakka, Siponen & Soini 2001, 22), jolloin se on laadultaan käyttök teknisesti parhaimmillaan. Aurinkoenergian ja puhaltimen avulla hake kuivuu kuivurissa pinnasta hyvissä olosuhteissa keväällä sopivaan kosteuteen jo päivässä parissa. Märkäkerroksen syntymisen voisi minimoida ottamalla hakkeen kasan pinnasta talteen kuivurista parin päivän välein, jos vain mahdollista, koska hake kuivaa pinnasta niin nopeasti. Kuivausaika riippuu hakepatjan paksuudesta ja siitä miten nopeassa tahdissa märkäkerros kulkee alaspäin, vaikkakin jos kuivataan ylivuotista haketta, niin märkäkerrosta ei tämän tutkimuksen kokemusten perusteella synny. Tätä olettamusta tukee myös Olli Koiviston Maatilan Pirkassa (2003) kertoma kokemus ylivuotisen hakkeen kuivauksesta, 2,5 metrin korkuinen hakekasa kuivattiin puhaltimella kahtena päivänä, eikä mitään ongelmia ilmennyt.

Maatilakokoluokan ratkaisuja ajatellen toimivan ja suhteellisen edullisen hake-/pilkekuivurin rakentaminen ei pitäisi olla ylivoimainen tehtävä, jos kiinnostusta vaan löytyy. Aurinkokeräimenkin saa rakennettua halutessaan melko edullisesti ja vaivattomasti, vastaavanlaisen lisäkeräimen rakennuskustannukset kuin tässä tutkimuksessa käytetyn ovat noin 5 €/m<sup>2</sup> puutavaran hinnasta riippuen. Lisähyötyä saa asfaltoimalla kuivurin lähiympäristön ja suuntaamalla keräimet etelään päin.. Suuremmassa mittakaavassa, jossa hakkeen käyttömäärät nousevat suuriksi, kuivuri ja mahdollinen lisäkeräin/keräimet vaativat jo isot tilat ja ihan pieni kuivuri ei enää silloin riitä hakemäärän kuivaukseen. Tulevaisuudessa esim. teräsheikkien päälle pystytetyt pressuhallikuivuriratkaisut tulevat luultavasti yleistymään polttopuiden kuivauksessa. Maatilakokoluokassa koneellisessa keinokuivauksessa säästetään aikaa ja polttoaineen laatu paranee kun hakepuurankaa ei tarvitse kuivata metsässä palstalla ja varastopaikalla, lisäksi lehtipuu ei kuorellisena kuiva pinossa järin hyvin, ellei niitä piirota mootto-

risahalla hakkuuvaiheessa. Stokeripolttimia valmistavan Säättö tuli Oy:n Petri Piipari toteaa (Maatilan Pirkka 2003), että ulkona luonnon energialla kuivatusta ylivuotisesta puusta tehdystä hakekuutiosta saadaan energiaa 600–700 kWh, mutta tuoreesta puusta tehdystä ja koneellisesti kuivatusta hakemotista noin 800–850 kWh. Samassa yhteydessä todetaan, että tuoreen hakkeen kuivaaminen potkuripuhaltimella kuluttaa sähköä noin 10 kWh:n verran kuutiolta. Koneellinen kuivaus kuitenkin kannattaa, koska kuiva hake palaa paremmin ja tuottaa enemmän energiaa.

## LÄHTEET

Airaksinen, L., Alakangas, E., Alanen, V.-M., Kainulainen, S., Puhakka, A., Siponen, T. & Soini, R. 2001. Hakelämmitysopas. Helsinki, Joensuu: Motiva, Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, VTT.

Hakelämmitys, pienopas. 2001. Itä-Suomen Energiatoimisto, Metsäkeskus Etelä-Savo, Metsäkeskus Häme-Uusimaa, Hämeen Maaseutukeskus.

Järvenpää, M., Kivinen, K. 1993 Kylmäilmakuivausopas. Työtehoseura, Pellervo-lehti.

Maatilan Pirkka. K-maatalouden asiakaslehti 4/2003.

Solmio, H., & Valkonen, J. 2002. Hakkeen käyttö ja haketekniikan kehitystarpeet maataloilla. Työtehoseuran raportteja ja oppaita 3. Helsinki.

Säteily Suomessa. [Http://www.avenet.fi/~solar/oppi/1\\_3.html](http://www.avenet.fi/~solar/oppi/1_3.html)